

# ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE COALESCIMENTO DE NÓDULOS DE FERRO-CARBONO A PARTIR DE MISTURAS E PELotas AUTORREDUTORAS NO FORNO ROTATIVO A 1.673 E 1.773 K

Alberto Eloy Anduze Nogueira<sup>2</sup>  
Adolfo Pillihuaman Zambrano<sup>2</sup>  
Cyro Takano<sup>3</sup>  
Marcelo Breda Mourão<sup>3</sup>  
John Bernardo Vilca Neira<sup>2</sup>

## Resumo

Uma das possibilidades tecnológicas obtidas com a redução de minério de ferro por autorredução é a obtenção de nódulos de ferro-carbono diretamente no processo, como no processo ITmk3. Para compreender melhor o processo de obtenção de nódulos de ferro-carbono no forno rotativo a 1673 e 1773 K, a partir de misturas e pelotas autorredutoras, foi estudado o efeito das seguintes variáveis: temperatura de processamento, temperatura *liquidus* da escória, quantidade de redutor, e tipo de conformação. Foi empregada uma adaptação do teste de desagregação por tambor (ASTM E279-97) e validado por moagem manual, para medir o grau de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono. Como resultados obtiveram-se: O incremento da temperatura de processamento aumenta o processo de coalescimento. A elevada temperatura *liquidus* da escória, obstaculiza o processo de coalescimento. O incremento da quantidade de redutor acima das necessidades de redução e carburação, restringem o processo de coalescimento. As misturas autorredutoras apresentam um maior grau de coalescimento do que as pelotas autorredutoras

**Palavras-chave:** Pelotas autorredutoras; Misturas; Escória; Coalescimento; Nódulos.

## STUDY OF COALESCING VARIABLES OF IRON-CARBON NUGGETS FROM MIXTURES AND SELF-REDUCING PELLETS IN THE ROTARY KILN AT 1673 AND 1773 K

### Abstract

One of the technological possibilities obtained by the reduction of iron ore by self-reduction is to obtain iron-carbon nuggets directly in the process, as in ITmk3 process. To better understand the process of obtain iron-carbon nuggets in a rotary kiln at 1673 and 1773 K from mixtures and self reducing pellets was studied the effect of following parameters: processing temperature, the slag *liquidus* temperature, the amount of reducer, and the type of conformation. Was used an adaption of the drum test (ASTM E279-97) and validated by manual grinding to measure the degree of coalescence of iron-carbon nuggets. As results were obtained: The increase in processing temperature increases the coalescence process. The high liquidus temperature of the slag, hinder the coalescing process. Increasing the amount of reducer above the needs for reduction and carburization, restrict the coalescence process. Self-reducing mixtures show better degree of coalescence than that of self-reducing pellets.

**Keywords:** Self-reducing pellets; Mixtures; Slag; Coalescence; Nuggets.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Membro da ABM. Pós-graduando do Depto. Eng. Metalúrgica e de Materiais da EP-USP

<sup>3</sup> Membro da ABM. Livre-Docente. Professor associado do Depto. Eng. Metalúrgica e de Materiais da EP-USP.

## 1 INTRODUÇÃO

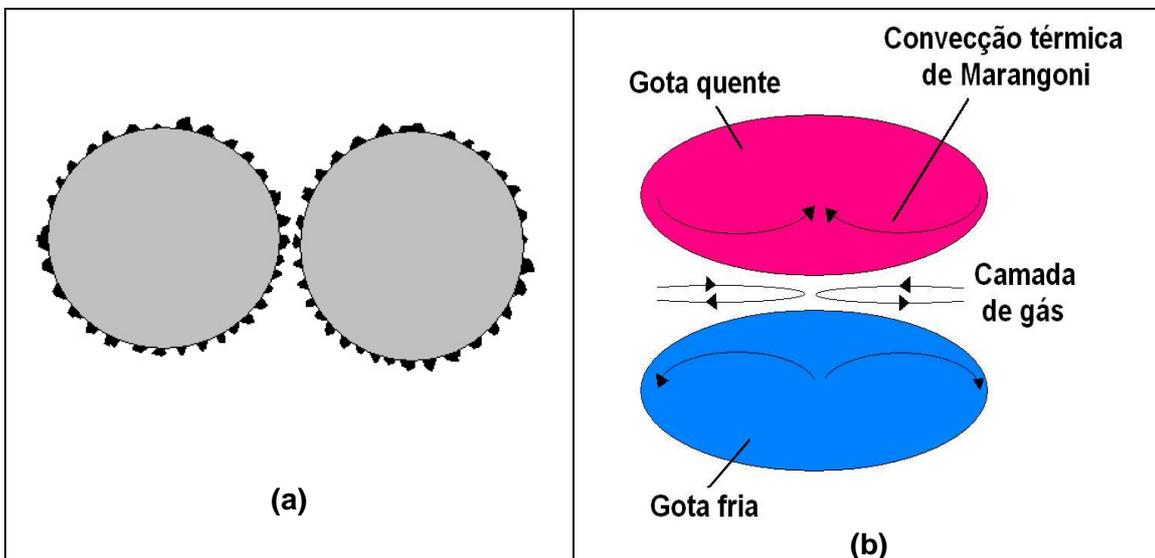
A comercialização da gusa ocorre em duas formas básicas: em pequenos lingotes, ou granulado. A obtenção direta de nódulos de ferro-carbono em processos de autorredução é uma técnica promissora pelo fato de eliminar o processo de lingotamento além da versatilidade de se ter uma carga mais desagregada. Por estes fatos, estuda-se o processo de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono em forno rotativo.

### 1.1 Causas da Não Coalescência dos Líquidos

Espera-se que duas gotas do mesmo líquido, quando entram em contato, imediatamente se unam para formar um único volume. Se duas gotas estão inicialmente separadas uma da outra, uma camada imiscível de gás circunda o líquido, levando um tempo para drenar o espaço intersticial entre as duas gotas. O resultado final é a coalescência.

Quando o líquido possui uma alta tensão superficial, ele fica muito susceptível à contaminação superficial, pelo fato das impurezas não poderem ultrapassar a barreira que a superfície lhes impõe, localizando-se externamente. Este é o caso, a modo de exemplo, de duas gotas de mercúrio (Figura 1 a).<sup>(1)</sup>

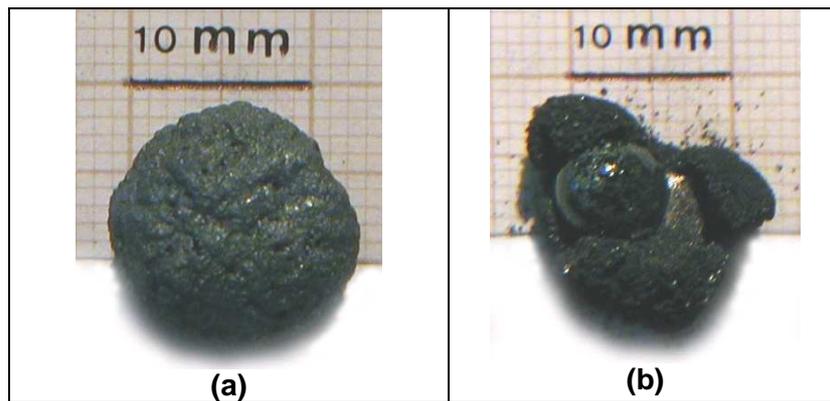
A convecção termo capilar implica o movimento de um fluido gerado pela variação da tensão superficial induzida por diferenças de temperatura. Para muitos líquidos, a tensão superficial decresce com o aumento da temperatura. Conseqüentemente, um gradiente de temperaturas na superfície pode gerar uma movimentação da superfície na direção oposta, que corresponde com a convecção influenciada pela diferença de viscosidade (Figura 1 b). O fenômeno é conhecido por convecção térmica de Marangoni.<sup>(2)</sup>



**Figura 1.** (a) Representação esquemática de duas gotas com alta tensão superficial. As impurezas localizam-se na superfície, dificultando a coalescência. (b) Separação de duas gotas pela convecção térmica de Marangoni.<sup>(1,2)</sup>

## 1.2 Efeito da Fase Líquida da Escória no Processo de Obtenção de Nódulos de Ferro-carbono

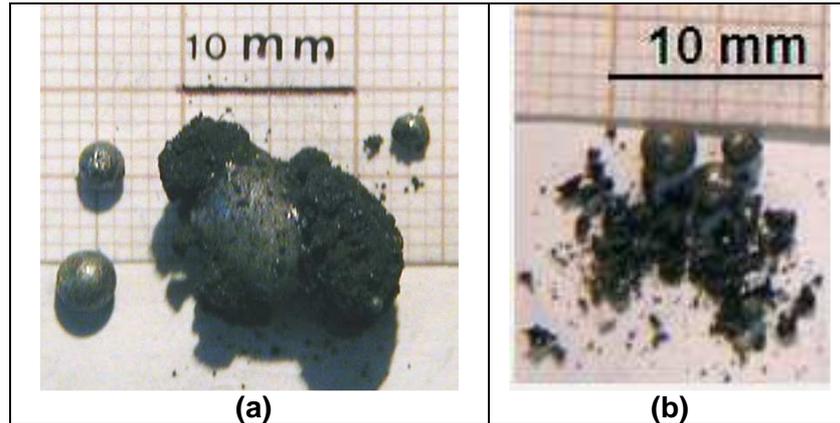
A não obtenção da fase líquida da escória dificulta o processo de carburação e coalescimento das partículas de ferro-carbono limitando a obtenção de nódulos, já que a escória em estado sólido cria uma barreira física.<sup>(3)</sup> Na Figura 2a tem-se uma pelota autorredutora cuja escória possui alta temperatura *liquidus*, na qual nem a fase metálica nem a escória fundiram, e na Figura 2b tem-se a mesma pelota autorredutora só que com escória de baixa temperatura *liquidus*, onde se observa a fusão tanto da fase metálica como da escória, obtendo-se nódulos de ferro-carbono.<sup>(4)</sup>



**Figura 2.** (a) Pelota autorredutora com escória de alta temperatura *liquidus*.(b) Pelota autorredutora com escória de baixa temperatura *liquidus*. Ambas com a mesma relação minério de ferro/redutor processadas na mesma temperatura.<sup>(4)</sup>

## 1.3 Efeito do Incremento do Redutor

Poder-se-ia pensar intuitivamente que o aumento da quantidade de redutor além da necessária para fornecer a composição eutética da liga ferro-carbono, levaria à obtenção de nódulos de ferro-carbono maiores, por aumentar a velocidade da carburação. Entretanto, isto não foi confirmado experimentalmente (Figuras 3a e b). Na medida em que se aumenta a quantidade necessária de redutor acima da concentração de carbono do ponto eutético (4,3%C), isto não aumenta a carburação do ferro líquido, pois nestas condições, o carbono não é o reagente limitante. O que limita neste ponto a carburação do ferro é a cinética de dissolução do carbono sólido no ferro líquido, que é controlada por transporte de massa. O excedente de redutor acima da composição eutética o que faz é aumentar a distância entre as partículas de ferro, dificultando o coalescimento, obtendo-se maior quantidade de nódulos de ferro-carbono de menor diâmetro do que quando se trabalha numa concentração perto da composição eutética.<sup>(1)</sup>

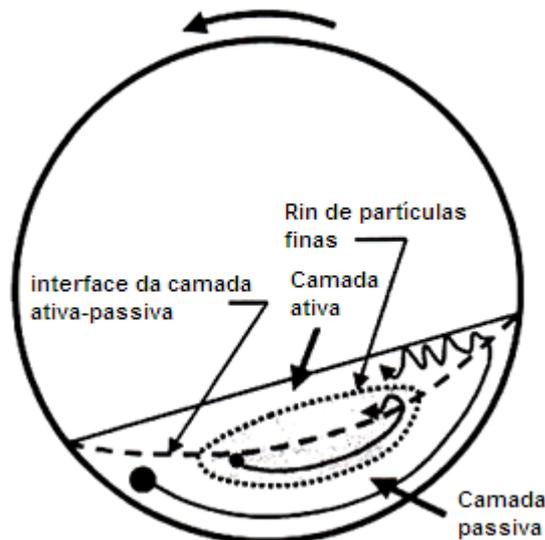


**Figura 3.** Comparação dos resultados obtidos com pelotas autorredutoras projetadas para se ter (a) composição eutética (b) excesso de carbono. Ambas processadas a 1.673 K (1.400°C) durante 10 minutos.<sup>(1)</sup>

#### 1.4 Processos de Mistura e Coalescimento no Forno Rotativo

O forno rotativo tem a peculiaridade de submeter sua carga a um processo de rotação e deslizamento complexo, o que promove a mistura e coalescimento. O fato de a carga estar se movimentando continuamente, faz com que uma porção esteja submetida ao peso da mesma, favorecendo o coalescimento do material.<sup>(5)</sup>

Experiências realizadas com cargas de granulometria diversa têm mostrado que quando existem partículas muito finas na carga, se formam duas regiões na secção transversal do forno como mostrado na Figura 4, onde se têm uma camada ativa e uma passiva.<sup>(6)</sup>



**Figura 4.** Esquema da movimentação do leito mostrando as camadas de partículas finas e grossas.<sup>(6)</sup>

A camada ativa é formada pelos 5% a 15% da camada superior do leito. O fluxo granular das partículas dentro de esta camada é caracterizado pelo alto cisalhamento e a velocidade de mistura de partículas na superfície do leito.

A camada passiva ou tampão de fluxo é a camada formada por partículas rolando como um corpo rígido paralelo a parede do forno. Excetuando para menores percolações ou grãos ultrafinos na parede do forno, não acontece mistura de partículas dentro de esta região.<sup>(6)</sup>

## 2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 2.1 Seleção das Experiências Estudadas

Com o intuito de estudar o efeito sobre o processo de coalescimento de nódulos de ferro-carbono no forno rotativo experimental, as seguintes variáveis: temperatura de processamento, Quantidade de redutor, Temperatura *liquidus* da escória e conformação como pelota ou mistura autorredutora, foram contempladas nas experiências apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Descrição das experiências selecionadas neste estudo

N Experiência.	Descrição
1	Mistura 81% min hem B.T. 19% C.P. +10% ARI 1673 K (1400°C).
2	Mistura 81% min hem B.T. 19% C.P. +10% ARI 1773 K (1500°C).
3	Mistura 43,48% min hem B.T. 56,52 % pó de serr. 1773 K (1500°C).
4	Mistura 81% min hem B.T. 19% C.P. +5% cal +50% recarga 1773 K. (1500°C).
5	Mistura 81% min hem B.T. 19% C.P. +5% cal 1673 K (1400°C).
6	Mistura 81% min hem B.T. 19% C.P. +5% cal 1773 K (1500°C).
7	Pelota 71% min hem B.T. 29% C.P. +10% ARI 1773 K (1500°C)
8	Pelota 71% min hem B.T. 29% C.P. +10% ARI 1673 K (1400°C)
9	Mistura 80% min hem A.T. 20% Gr. 1773 K (1500 °C) .
10	Mistura 78% min hem A.T. 22% C.P.. 1773 K (1500 °C).
11	Mistura 80% min hem A.T. 20% Gr. +10% B.B.=1, 1773 K (1500 °C).
12	Mistura 70% min hem A.T. 30% Gr. 1773 K (1500 °C) .
13	Pelota 80% min hem A.T. 20% Gr. +7% ARI 1773 K (1500°C).
14	Pelota 80% min hem A.T. 20% Gr. +10% ARI 1773 K (1500°C).
15	Pelota 78% min hem A.T. 22% C.P. +7% ARI 1773 K (1500°C).
16	Pelota 70% min hem A.T. 30% Gr. +10% ARI, 1773 K (1500°C)
17	Pelota 80% min hem A.T. 20% Gr. Melaço, 1773 K (1500°C).
18	Mistura 81% min hem B.T., 19% C.P., +5% cal +2% fluorita 1673 K (1400 °C).
19	Mistura 81% min hem B.T., 19% C.P., +7% ARI, 1773 K (1500 °C).
20	Mistura 80% min hem de A.T., 20% Gr +10% ARI, 1773 K (1500 °C)

*Min.: minério; Hem: hematítico; B.T: Baixo teor; A.T: Alto teor; C.P: Coque de petróleo; ARI: Cimento de alta resistência inicial, pó de serr.: pó de serragem; Gr: Grafita; B.B.: Basicidade binária.*

### 2.2 Processamento das Misturas e Pelotas Autorredutoras no Forno Rotativo

As misturas e pelotas autorredutoras foram processadas em um forno rotativo (Figura 5a) a 1.673 K (1.400 °C) e 1.773 K (1.500°C ). O perfil interno de temperatura do forno pode ser observado na Figura 5b. Para reduzir a presença de oxigênio pelo vazamento do ar, era injetado argônio a uma taxa aproximada de 1NL/min. O material era carregado dentro do forno rotativo com ajuda de um transportador vibratório. As amostras eram processadas por um tempo aproximado de 10 minutos, tempo considerado satisfatório para a completa redução carburação e coalescimento. Este tempo de residência era atingido com uma determinada inclinação, dependendo da amostra (aproximadamente 1 [deg] para pelotas e 5 [deg] para misturas autorredutoras).

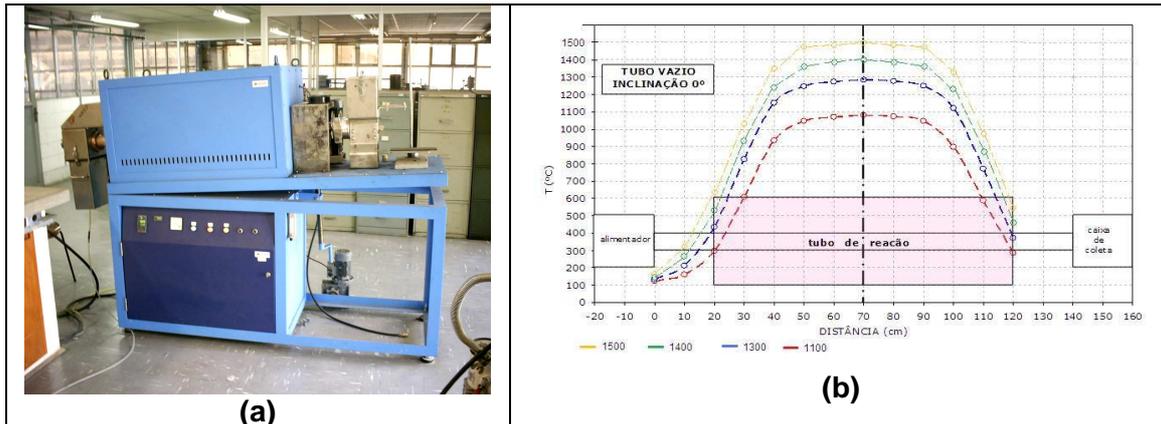


Figura 5. (a) Vista frontal do forno rotativo empregado. (b) Perfil interno de temperatura em [°C] do forno rotativo.

### 2.3 Medição do Grau de Coalescimento Dependendo da Composição, do Tipo de Conformação e da Temperatura

Para medir o grau de coalescimento, o qual é proporcional ao diâmetro das partículas de ferro-carbono obtidas, o material foi desagregado pelo método do tambor.<sup>(7)</sup> Como não existem normas específicas de desagregação para processos autorredutores, para validar este método foi comparado com a desagregação por moagem manual, em almofariz de porcelana, levantadas suas análises granulométricas e analisada a dispersão entre ambos os métodos. Para medir a granulometria do produto obtido, foram empregadas duas baterias de malhas.<sup>(8)</sup> A primeira, com uma distribuição de malhas bem abrangente, para mostrar a distribuição média do produto, utilizando as aberturas de malhas: 20 Tyler, 32 Tyler, 50 Tyler, 100 Tyler e 150 Tyler. A segunda, com o intuito de medir a distribuição granulométricas dos nódulos de ferro-carbono, empregando-se aberturas de malha maiores apontadas à continuação: 5/16 Tyler, 3.5 Tyler, 4 Tyler, 7 Tyler e 20 Tyler.

### 2.4 Desagregação do Material pelo Método do Tambor (norma ASTM E 279-97).

Como neste caso a quantidade de material obtida nos ensaios em geral é inferior a 300 gramas foi redimensionado o tambor para se adaptar a esta realidade. O tambor de alumina de alta densidade tem como medidas 300 ±1 mm de comprimento interno (Figura 6a) e 200 ±1 mm de diâmetro interno (Figura 6b) aproximadamente, com dois levantadores em L de 50,8X50,8X1 mm. O material previamente seco foi processado durante 200 revoluções com uma rotação de 24 ±1 R.P.M. e posteriormente foi analisada sua granulometria, estabelecendo comparações entre a moagem manual, (pressupondo-se que esta não teria força suficiente para triturar os nódulos de ferro-carbono, e sim as aglomerações de escória) e o teste do tambor.

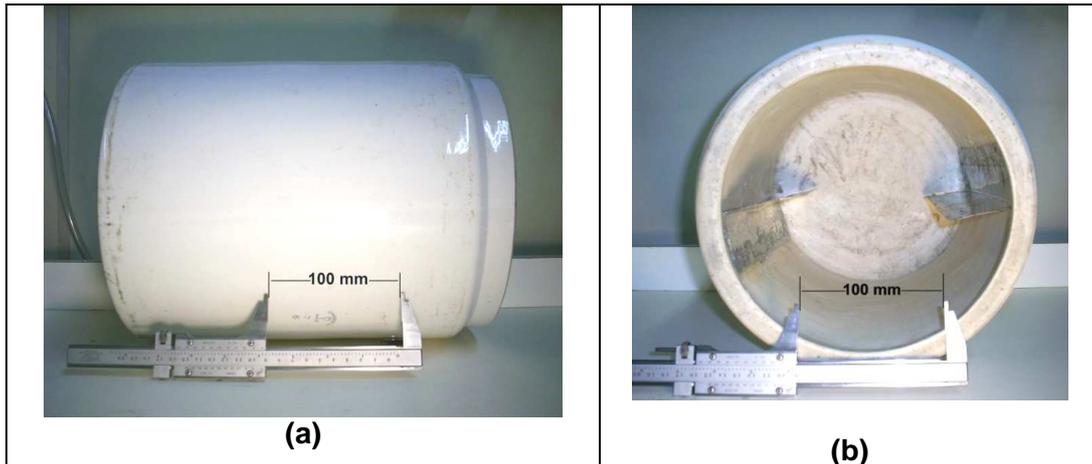


Figura 6. Jarra de cerâmica empregada no teste do tambor. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal, mostrando os levantadores em L.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Efeito da Temperatura de Processamento na Distribuição Granulométrica dos Nódulos de Ferro-carbono das Misturas Autorredutoras

Na Figura 7 tem-se uma comparação do efeito da temperatura na distribuição granulométrica dos nódulos de ferro-carbono. É possível observar que para uma mesma composição e tempo de processamento, a experiência n. 2 processada a temperatura maior apresenta 20,3% de nódulos de ferro-carbono maiores que 7,93 mm, contra 9,3% da experiência n. 1, o que permite deduzir que o incremento da temperatura aumenta a porcentagem de coalescimento.

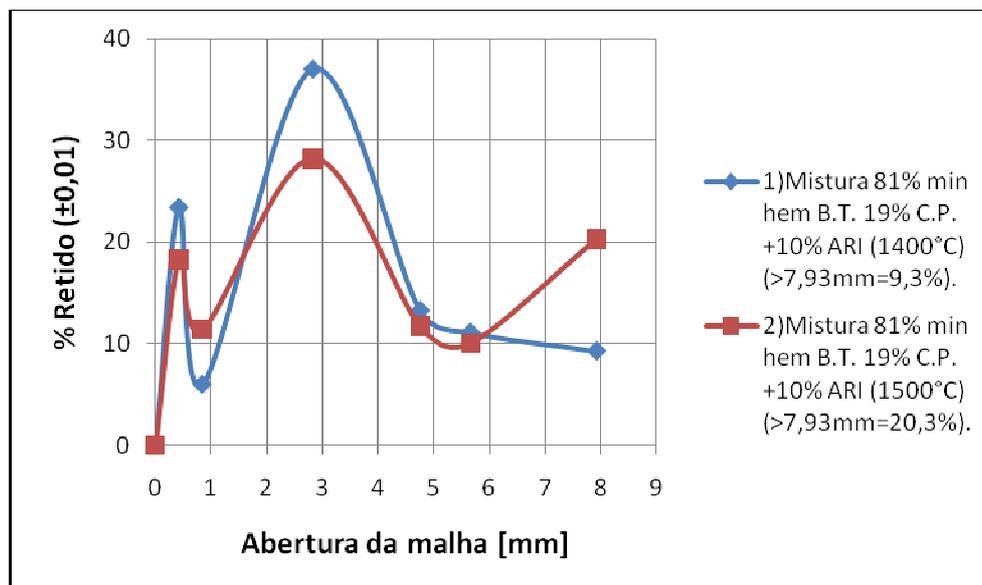
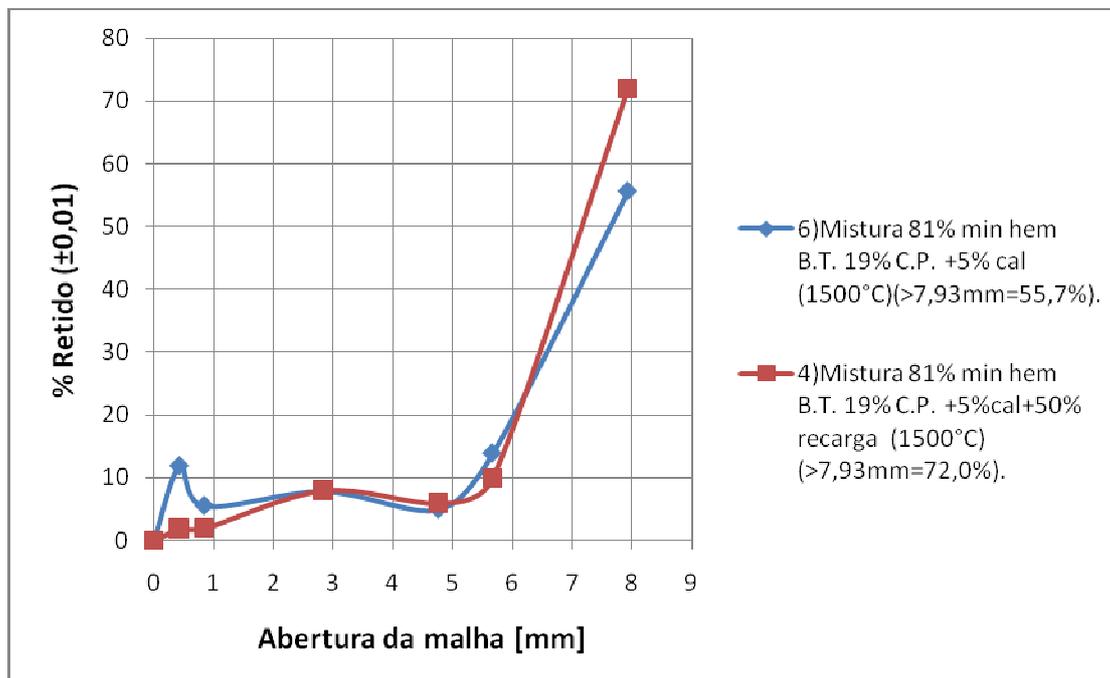


Figura 7. Efeito da temperatura de processamento sobre a granulometria dos nódulos de ferro-carbono.

### 3.2 Efeito da Recarga de Material na Distribuição Granulométrica dos Nódulos de Ferro-carbono

A recarga do material consiste no retorno do produto do ensaio sem processamento adicional junto com a matéria prima sem processar. Na Figura 8 tem-se a comparação da distribuição granulométrica da mistura autorredutora de 81% de minério hematítico de baixo teor, 19% de coque de petróleo, +5% de cal (exp.6), a qual apresenta 55,7% de nódulos de ferro-carbono acima de 7,93 mm de diâmetro, e a mistura de 81% de minério hematítico de baixo teor, 19% de coque de petróleo, +5% de cal, +50% de recarga (exp.4) a qual possui 72,0% de nódulos de ferro-carbono com diâmetro superior a 7,93 mm. A recarga sem nenhum tipo de beneficiamento aumenta em um 16,3% o coalescimento dos nódulos de ferro-carbono maiores.

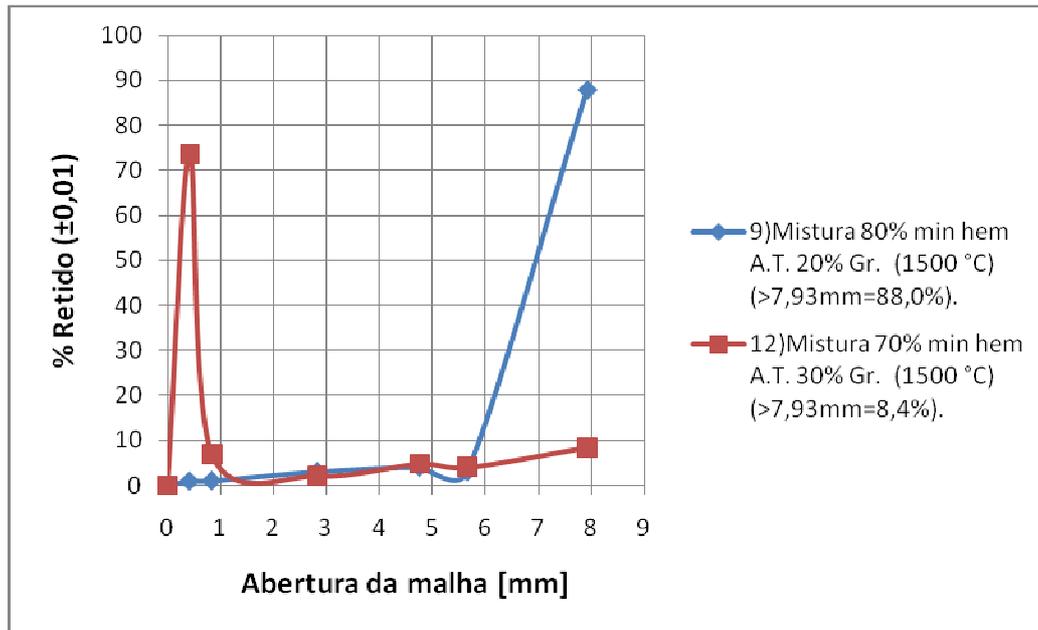


**Figura 8.** Comparação da distribuição granulométrica da mesma matéria prima com e sem recarga, nas mesmas condições de tempo e temperatura.

A recarga de material favorece o coalescimento possivelmente porque os nódulos de ferro-carbono carregados desde o início do processo servem de substrato de crescimento para as partículas menores obtendo-se novos nódulos de ferro-carbono maiores.

### 3.3 Efeito do Incremento do Redutor Acima das Quantidades Necessárias na Distribuição Granulométrica dos Nódulos de Ferro-carbono

Na figura 9 tem-se a comparação das análises granulométricas dos nódulos de ferro-carbono obtidos a partir de uma mistura autorredutora (exp. 9) de 80% de minério hematítico de alto teor, 20% de grafita processada a 1.773 K (1.500°C), projetada para se obter uma carburação próxima dos 5% da massa do ferro total, e a outra, uma mistura (exp. 12) autorredutora de 70% de minério hematítico de alto teor, 30% de grafita, processada a 1.773 K (1.500°C) projetada para se ter excesso de carbono.



**Figura 9.** Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidas a partir de misturas autorredutoras elaboradas com 20 e 30% de grafita da relação minério-redutor.

É possível observar que o excesso do redutor gera um perfil granulométrico dos nódulos de ferro-carbono inferior ao do seu semelhante com menos carbono. Este fato também é válido para as pelotas autorredutoras.

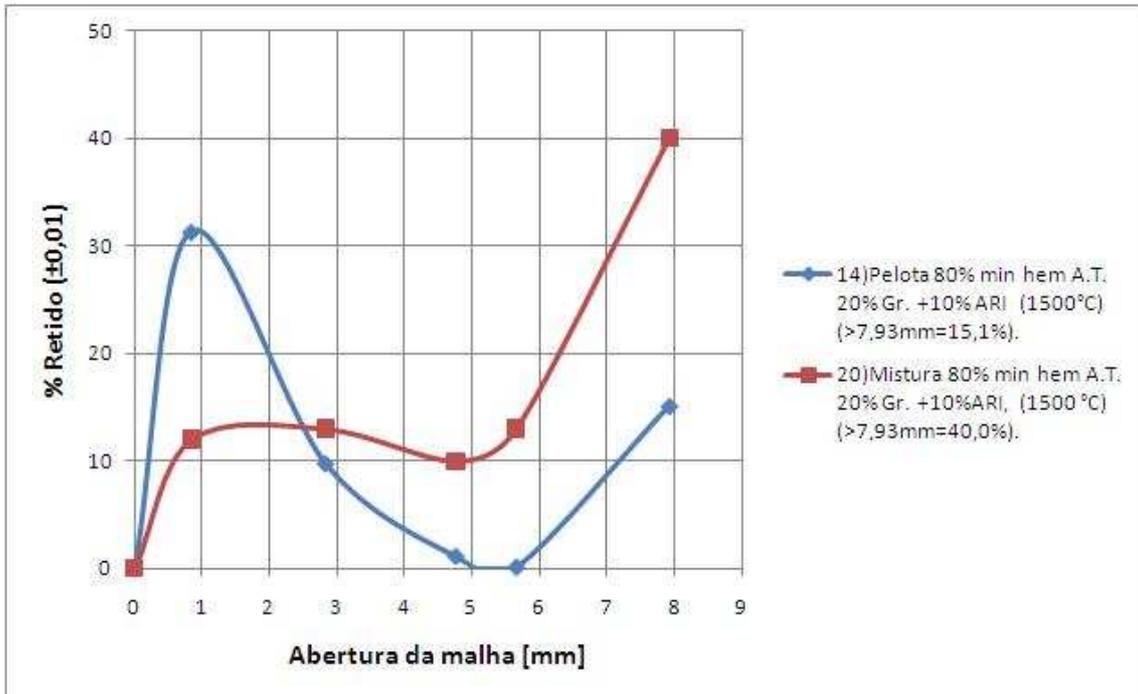
Como mostrado em outro estudo,<sup>(1)</sup> o excesso de carbono obstaculiza o processo de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono, devido a que o ferro está saturado ou em processo de saturação de carbono e não consegue mais absorver-lo rapidamente, sendo que o restante do redutor age como material inerte, obstaculizando o contato e por adição o coalescimento dos nódulos de ferro-carbono.

### 3.4 Comparação das Análises Granulométricas dos Nódulos de Ferro-carbono Obtidas com Misturas e Pelotas Autorredutoras, com a mesma Composição e Variáveis de Processamento

Na Figura 10 tem-se a comparação das análises granulométricas dos nódulos de ferro-carbono obtidas com a mistura autorredutora exp.20 e a pelota autorredutora exp.14, ambas processadas durante o mesmo tempo e temperatura com a mesma composição química.

Na análise granulométrica, a mistura autorredutora possui uma fração de nódulos de ferro-carbono de 40% em massa de diâmetro maior que 7,93 mm, superior aos 15,1% em massa de diâmetro maior que 7,93 mm da pelota autorredutora, dando uma diferença de nódulos de ferro-carbono de 24,9% em massa com diâmetro maior que 7,93 mm a favor da mistura. Do anterior deduz-se que o grau de coalescimento é maior na mistura do que nas pelotas autorredutoras, isto provavelmente se deva ao fato da mistura autorredutora não ter uma estrutura restrita por uma geometria como no caso da pelota autorredutora gerando que os fenômenos de transporte de massa e calor se maximizem, ou pela existência de processos de segregação<sup>(6)</sup> de material, nos quais os materiais mais pesados vão para o fundo da carga durante a rotação do forno auxiliando no coalescimento.

A modo de ilustração, com as devidas ressalvas experimentais e estatísticas pelo fato de estar comparando misturas autorredutoras diferentes com pelotas autorredutoras diferentes, é possível observar que em geral, a média (67,1%) dos nódulos de ferro-carbono com diâmetro superior a 7,93 mm provenientes das misturas autorredutoras é superior a média (20,0%) das pelotas autorredutoras, fato que confirma o anteriormente exposto.



**Figura 10.** Comparação das análises granulométricas dos nódulos de ferro-carbono obtidas com misturas e pelotas autorredutoras, com a mesma composição e variáveis de processamento.

### 3.5 Influência da Temperatura *liquidus* da Escória no Processo de Coalescimento de Nódulos de Ferro-carbono de Misturas Autorredutoras Processadas no Forno Rotativo

Na Figura 11 é possível observar a comparação granulométrica dos nódulos de ferro-carbono obtidos a partir da mistura autorredutora (exp.20) de 80% de minério hematítico de alto teor, 20% de grafita +10% ARI, processada a 1.773 K (1.500°C), com a mistura autorredutora (exp.11) de 80% de minério hematítico de alto teor, 20% de grafita +10% de escória de basicidade binária =1.

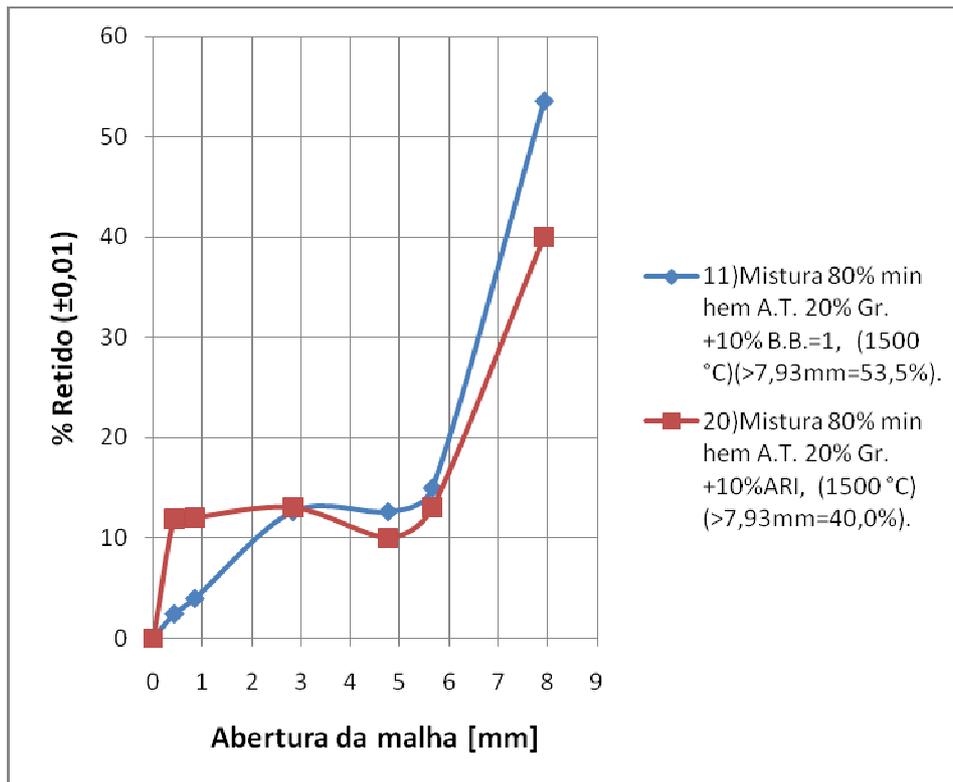


Figura 11. Comparação das granulometrias dos nódulos de ferro-carbono obtidos com a mesma mistura autorredutora com igual quantidade de escória com diferentes temperaturas *liquidus*.

É notável que a mistura autorredutora com a escória de basicidade binária =1, cuja temperatura *liquidus* foi determinada aproximadamente em 173 K (1.500°C) <sup>(9)</sup> apresenta um maior grau de coalescimento (>7,93 mm = 53,5%) que a mistura autorredutora com escória formada basicamente por cimento tipo ARI (>7,93mm=40,0%), com temperatura *liquidus* de aproximadamente 273 K (2.000°C). <sup>(9)</sup>

Como discutido previamente no capítulo 1.2, a temperatura *liquidus* da escória interfere no processo de carburação e coalescimento dos nódulos de ferro-carbono pelo fato de que a escória cria uma barreira física entre as partículas de ferro com elas mesmas, e entre as partículas de ferro e o carbono.

#### 4 CONCLUSÕES

- O incremento da temperatura de processamento aumenta o grau de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono.
- A escória de alta temperatura *liquidus* compromete o processo de coalescência das partículas de ferro-carbono em maior grau do que a escória de baixa temperatura *liquidus*.
- A recarga do material de saída junto com material sem processar aumenta o grau de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono.
- O incremento da quantidade de redutor acima do necessário prejudica o coalescimento dos nódulos de ferro-carbono.
- As misturas autorredutoras apresentam maior grau de coalescimento dos nódulos de ferro-carbono do que as pelotas autorredutoras.
- O melhor resultado apresentado sob ponto de vista do coalescimento foi o da experiência n. 10, a mistura autorredutora de 78% de minério hematítico de



alto teor, 22% de coque de petróleo, processada a 1.773 K (1.500°C), com 87,9% de nódulos de ferro-carbono com diâmetro superior a 7,93 mm. O pior desempenho foi o da experiência n.16, a pelota autorredutora de 70% de minério hematítico de alto teor, 30% de grafita, +10% de cimento *Portland* tipo ARI, processada a 1.773 K (1.500°C), com 0,0% de nódulos de ferro-carbono com diâmetro superior a 7,93 mm.

## Agradecimentos

Agradece-se a Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo n° 03/02404-0, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo n° 141980/2005-2 e ao instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo (IPT) pelos auxílios prestados.

## REFERÊNCIAS

- 1 Nogueira, A; Estudo do processo de redução e fusão de pelotas autorredutoras de minério de ferro no intervalo de temperaturas entre 1573 K e 1673 K. Tese de mestrado, USP, São Paulo, Brasil, 2005, 10-80.
- 2 Aversana, P; Neitzel, G; When liquids stay dry, *Physics Today*, January, 1998, 38-41.
- 3 Nogueira, A; Estudo preliminar da influência da escória líquida no transporte de carbono a 1673 K, 63º congresso anual da ABM, Santos-SP – Brasil, julho 2008, 104-114.
- 4 Nogueira, A. Mourão, M. Takano, C. Estudo do processo de redução e fusão de pelotas autorredutoras no intervalo entre 1573 a 1673 K, 59º congresso anual da ABM-Internacional, 19 de julho de 2004, São Paulo-SP-Brasil, 114-124.
- 5 Nityanand, N. Manley, B. Henein, H. An analysis of radial segregation for different sized spherical solids in rotary cylinders. *Metallurgical and Materials Transactions B*, volume 17B, USA, June 1986, 247-257.
- 6 Dhanjal, S; Barr, P; Watkinson, E; The Rotary kiln: an investigation of bed heat transfer in the transverse plane. *Metallurgical and Materials Transactions B*, volume 35B, USA, December 2004, 1059-1070.
- 7 ASTM E 279-97.
- 8 ASTM B 214-76.
- 9 Committee for Fundamental Metallurgy. *Slag Atlas*. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Germany, Dusseldorf, 1981.